

# FRP로 휨보강된 콘크리트 공시체의 압축강도 향상에 관한 연구

## Compressive Strength Enhancement of Concrete Cylinders Confined with FRP Wrapping

김영섭\*                      정영수\*\*                      박창규\*\*\*                      송희원\*\*\*\*  
Kim, Young Sub      Chung, Young Soo      Park, Chang Kyu      Song, Hee Won

### ABSTRACT

Triaxial behavior of concrete cylinders wrapped with FRP material has been investigated for the increase of concrete strength by lateral confinement. Using the model by Richart et al., a modified empirical equation was proposed to estimate the strength of concrete cylinders with FRP confinement based on the linear relationship between the concrete strength and lateral confining pressure.

From the experimental stress-strain result of the cylinder specimens having similar confining pressure, less ductility was observed for higher strength concrete. But the compressive strength of the specimen was linearly increased by lateral confinement. The confinement effectiveness coefficient for the strength enhancement of the cylinders by FRP wrap was obtained as 2.27 from the regression analysis.

### 1. 서론

압축상태에 있는 콘크리트에서 응력-변형률 관계는 일반적으로 일축압축시험으로부터 얻는다. 그러나 대부분의 콘크리트 구조물은 다축응력 상태에 있다. 다축응력 상태의 응력-변형률 관계를 규명하는 것은 설계의 가장 기본적인 과제이기 때문에 다양한 다축응력을 받는 콘크리트 압축응답의 평가는 매우 중요한 사항이다. 그래서 다축응력상태를 모사하기위한 방법으로 3축압축응력 평가실험을 하였다. 기존의 모델들은 강관 및 띠철근 등을 통해 만들어진 것이 대부분이다. 따라서 본 실험에서는 FRP시트로 콘크리트를 구속시켜 3축압축응력을 평가하는 실험을 하였다. 그리고 FRP의 구속효과로 인한 콘크리트 압축부재의 강도증가를 고려하기 위해 Richart et al.(1928) 모델을 기초로 하였으며, 보강된 콘크리트의 강도증가를 예측하기 위해 몇 가지의 변수를 적용하였다.

본 연구에서는 FRP로 구속된 콘크리트의 구속효과로 인한 콘크리트 강도증진효과 및 연성증진효과, 휨구속효과를 규명하기 위해 섬유유종류와 콘크리트의 압축강도를 실험 변수로 하여 구속된 콘크리트 응력-변형률 관계식을 분석하고 압축강도 추정식을 제안하고자 한다.

\* 정희원, 중앙대학교 대학원  
\*\* 정희원, 중앙대학교 토목공학과 교수  
\*\*\* 정희원, 중앙대학교 토목공학과 박사수료  
\*\*\*\* 정희원, 중앙대학교 대학원

## 2 실험 개요

### 2.1 실험체의 제작

본 실험에서는 각각  $\phi 150 \times 300$  mm와  $\phi 100 \times 200$  mm 원형 콘크리트 표준 공시체 72개를 제작하였으며, 그 중 FRP시트로 보강된 공시체는 54개, 무보강공시체는 18개이다. 시험도중 섬유에 하중간섭으로 인한 실험체 양쪽 끝단 섬유의 국부 파괴를 피하기 위해 양쪽 끝단에 5 mm씩 간격을 두고 섬유를 보강하였다. 최대 3000 kN의 용량을 가진 UTM을 사용하여 3축압축실험을 하였으며, 하중재하는 초당  $0.2 \sim 0.4$  N/mm<sup>2</sup>로 하중을 증가시켰다. 축방향변위와 횡방향변위는 그림 1과 같이 컴프레소미터와 익스텐소미터를 이용하여 계측하였다.

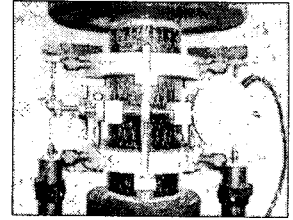


그림 1 하중변위의 측정

표 1 실험체의 종류

실험체명*	보강 접수	실험체명*	보강 접수	실험체명*	보강 접수	실험체명*	보강 접수
20-10-A21~A23	2 겹	20-10-G21~G23	2 겹	16-15-A21~A23	2 겹	16-15-G21~G23	2 겹
34-10-A21~A23	2 겹	34-10-G21~G23	2 겹	29-15-A21~A23	2 겹	29-15-G21~G23	2 겹
43-10-A21~A23	2 겹	43-10-G21~G23	2 겹	42-15-A21~A23	2 겹	42-15-G21~G23	2 겹
20-10-C21~C23	2 겹	20-10-N01~N03	-	16-15-C21~C23	2 겹	16-15-N01~N03	-
34-10-C21~C23	2 겹	34-10-N01~N03	-	29-15-C21~C23	2 겹	29-15-N01~N03	-
43-10-C21~C23	2 겹	43-10-N01~N03	-	42-15-C21~C23	2 겹	42-15-N01~N03	-

\* 20-10-A21 (20 : 콘크리트강도, 10 : 공시체 지름, A : 아라미드섬유, 2 : 보강 접수, 1 : 시험체 NO.)  
A : 아라미드섬유 C : 탄소섬유 G : 유리섬유 N : 무보강

### 2.2 일반적인 콘크리트 모델

Richart는 구속된 콘크리트가 구속되지 않은 콘크리트에 비해 최대압축강도와 강성이 증가한다는 것과 하중이 최대 점에 도달하고 나서 급격히 떨어지지 않고 지연시키려는 특성을 처음 관찰하였다. 그리고 낮은 압력 범위의 유압에 의해 구속된 콘크리트 압축강도 실험을 통해 축방향 압축강도와 횡구속력 사이의 계수비( $k_1=4.1$ )가 선형관계에 있음을 밝혀내었다. 이 실험에서는 횡구속력으로 인한 콘크리트 압축부재의 강도증가를 예측하기 위해 Richart가 제시한 경험식을 기초 하였다. [식 (1)]

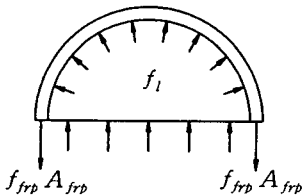


그림 2 FRP의 횡구속모델

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (1)$$

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} \quad (2)$$

여기서,  $f'_{cc}$  = 횡구속 콘크리트의 최대압축강도,  $f'_{co}$  = 무보강 콘크리트 최대압축강도  $f_l$  = 횡구속력,  $k_1$  = 강도증가계수,  $d$  = 구속 콘크리트의 지름,  $t_{frp}$  = FRP의 두께

그림 2는 횡구속압의 자유 물체도로 FRP시트의 횡보강으로 인하여 원형콘크리트는 등분포한 횡구속력을 받는다. FRP시트로 인한 최대횡구속력은 FRP의 강도, 섬유량 그리고 구속콘크리트의 지름에 관계가 있다. 따라서 횡구속력은 그림 2의 평형조건으로부터 식(2)로 나타낸다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 응력-변형률

본 실험에 적용된 공시체는  $\phi 150 \times 300$  mm와  $\phi 100 \times 200$  mm 두 종류를 사용하였으며 결과 분석시  $\phi 100 \times 200$  mm의 결과에는 강도보정계수 0.97을 적용하여 분석하였다. 그리고 실험 결과에 대한 그래프와 표는 지면관계상  $\phi 150 \times 300$  mm 만 본 논문에 표기하였다.

$\phi 150 \times 300$  mm 콘크리트 공시체 실험 결과, 평균적으로 각각 16, 29, 42 MPa를 얻었다. 측정된 응력-변형률 곡선은 항복 이후에도 연화구간을 가지지 않고 일정 구간에서 계속 강도가 증가하다가 파괴점에서 최대압축강도를 나타냈다. 그리고 응력-변형률 곡선은 살펴보면 압축부재의 거동은 처음 콘크리트가 어느 정도 하중을 받다가 콘크리트의 횡변위가 진행하며 섬유로 전달된다. 이 과정에서 섬유가 콘크리트의 횡방향 변위를 제어하여 콘크리트의 구속효과를 증가시킨다. 이때 그림 3과 각기 다른 기울기를 가지는 두 개의 선으로 구성된 복선형 응력-변형률 선도를 나타낸다. 동일한 섬유량에서 콘크리트 압축강도를 증가 시키면 최대응력은 증가하지만 연성은 줄어드는 경향을 보였으며 전체적으로는 콘크리트강도와 변형률은 증가되는 것으로 분석되었다. 이는 FRP의 높은 인장강도와 취성적인 재료적 특성 때문인 것으로 판단된다. 압축강도와 변형률 그리고 각각 증가량을 표 2에 정리하였다.

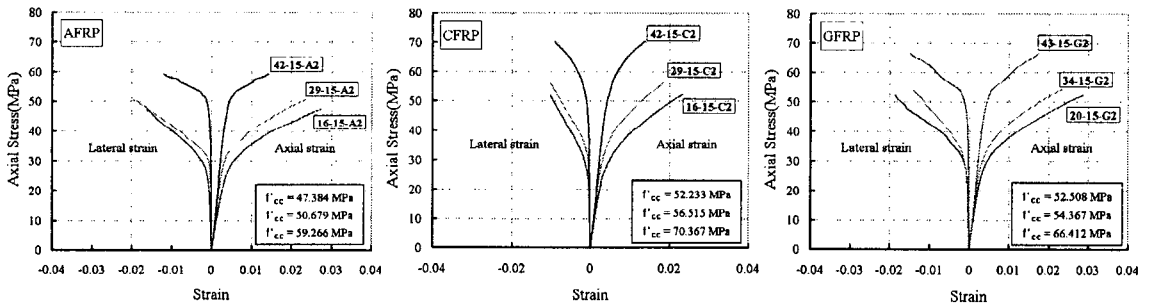


그림 3  $\phi 150 \times 300$  mm 응력-변형률 선도

표 2 평균 콘크리트강도별 보강효과

구 분	무보강 콘크리트		보강된 콘크리트		섬유 보강효과	
	압축강도	압축변형률	압축강도	압축변형률	강도증가	연성증가
16-15-A2	15.92	0.00419	47.38	0.0273	3.0	6.5
29-15-A2	28.84	0.00117	50.68	0.0236	1.8	20.2
42-15-A2	42.38	0.00232	59.34	0.01713	1.4	7.4
16-15-C2	15.92	0.00419	52.30	0.02332	3.3	5.6
29-15-C2	28.84	0.00117	56.54	0.01881	2.0	16.1
42-15-C2	42.38	0.00232	70.42	0.01407	1.7	6.1
16-15-G2	15.92	0.00419	52.50	0.02872	3.3	6.9
29-15-G2	28.84	0.00117	54.44	0.02337	1.9	20.0
42-15-G2	42.38	0.00232	66.41	0.01750	1.6	7.5

#### 3.2 강도증가계수( $k_1$ )

식 (1)의 모델은 띠철근 등의 강재에 이용되는 모델이기 때문에 강재와 FRP는 서로 다른 재료적 차이가 있어 FRP로 횡구속된 콘크리트에 기존의 압축강도 모델을 적용하기는 어렵다고 판단된다. 따라서 FRP 재료적 특성에 맞는 강도증가계수는 실험결과를 근거로 그림 4와 같이 분석하여 강도증가계

수를 나타냈으며, 표 3으로 콘크리트의 압축강도를 예측한 결과를 검토하였다. 그리고 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도와 횡구속력의 관계를 설명하기 위해 일반적인 방법인 선형관계를 이용하여 식 (3)으로 나타내었다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 2.27 f_l \quad \text{or} \quad \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.27 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3)$$

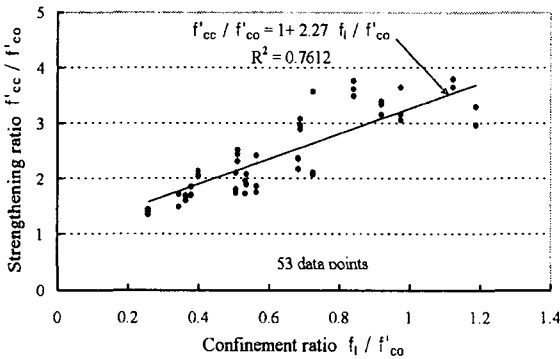


그림 4 해석 결과

표 3 콘크리트의 압축강도 예측 결과 검토

구분	$f'_{cc}$	$f'_{co}$	$f_l$	식(3) $f'_{cc}$
16-15-A2	47.383	15.92	16.45	41.145
29-15-A2	50.677	28.84	23.26	64.498
42-15-A2	59.337	42.38	21.97	76.063
16-15-C2	52.303	15.92	16.45	41.145
29-15-C2	56.540	28.84	23.26	64.498
42-15-C2	70.417	42.38	21.97	76.063
16-15-G2	52.500	15.92	16.45	41.145
29-15-G2	54.440	28.84	23.26	64.498
42-15-G2	66.407	42.38	21.97	76.063

#### 4. 결론

실험적 연구를 통해 평가된 FRP로 횡구속된 콘크리트 압축부재의 거동에 관한 주요 결론은 다음과 같으며, FRP의 구속효과로 인한 콘크리트 강도 증가를 추정하기 위해 식을 제안하였다.

- 1) 동일한 섬유를 감은 콘크리트에 시험체에서 발생한 응력-변형률을 살펴보면 콘크리트압축강도가 큰 시험체에서 같은 량의 섬유량으로 높은 응력 값을 나타내었으며, 변형률은 고강도 콘크리트와 같이 강도가 커질수록 변형률 감소를 나타내었다.
- 2) 평균 콘크리트강도별 보강효과에서 구분을 보면 29로 시작하는 시험체가 있다. 여기서 연성증가 값이 상당히 큰 값이 나왔는데, 이는 무보강 콘크리트 시험시 다른 강도의 무보강시험체에 비해 빠른 재하속도로 인하여 최대변형률이 0.001대에서 파괴되었으며, 이런 연유로 연성증가 값이 크게 분석되었다. 따라서 이 값을 제외하면 강도는 1.4~3.3 배와 연성은 5.6~7.5 배로 증가되었다.
- 3) Richart et al.(1928)이 제안한 강도증가계수( $k_1$ )은 탄소성을 가지는 철근콘크리트에 사용되는 것이다. 본 연구에서는 선형탄성재료인 FRP의 특성을 고려한 강도 증가계수를 실험결과를 통해 나타내었고, 선형적 관계를 정리하면 다음과 같다.

#### 참 고 문 헌

1. Mander, F. b., Priestley, M. J., N. and Park, R. (1988), "Theoretical stress-strain model for confined concrete", journal of structural engineering, ASCE, Vol. 114, No.8, pp. 1804-1826.
2. Park, R. and Raulay, T. (1975), "Reinforced concrete structures" John Wiley & Sons.
3. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., Lam, L. (2002), "FRP Strengthened RC Structures", John Wiley & Sons.